

## DISINFEKSI UNTUK PROSES PENGOLAHAN AIR MINUM

Oleh :  
Nusa Idaman Said

Pusat Teknologi Lingkungan, BPPT

### Abstract

*Water disinfection means the removal, deactivation or killing of pathogenic microorganisms. Microorganisms are destroyed or deactivated, resulting in termination of growth and reproduction. When microorganisms are not removed from drinking water, drinking water usage will cause people to fall ill. Chemical inactivation of microbiological contamination in natural or untreated water is usually one of the final steps to reduce pathogenic microorganisms in drinking water. Combinations of water purification steps (oxidation, coagulation, settling, disinfection, and filtration) cause (drinking) water to be safe after production. As an extra measure many countries apply a second disinfection step at the end of the water purification process, in order to protect the water from microbiological contamination in the water distribution system. Usually one uses a different kind of disinfectant from the one earlier in the process, during this disinfection process. The secondary disinfection makes sure that bacteria will not multiply in the water during distribution.*

*This paper describes several technique of disinfection process for drinking water treatment. Disinfection can be attained by means of physical or chemical disinfectants. The agents also remove organic contaminants from water, which serve as nutrients or shelters for microorganisms. Disinfectants should not only kill microorganisms. Disinfectants must also have a residual effect, which means that they remain active in the water after disinfection. For chemical disinfection of water the following disinfectants can be used such as Chlorine ( $Cl_2$ ), Hypo chlorite ( $OCl$ ), Chloramines, Chlorine dioxide ( $ClO_2$ ), Ozone ( $O_3$ ), Hydrogen peroxide etc. For physical disinfection of water the following disinfectants can be used is Ultraviolet light (UV). Every technique has its specific advantages and and disadvantages its own application area such as environmentally friendly, disinfection byproducts, effectivity, investment, operational costs etc.*

**Kata Kunci** : Disinfeksi, bakteri, virus, air minum, khlor, hip khlorit, khloramine, khlor dioksida, ozon, UV.

### 1. PENDAHULUAN

Bahaya atau resiko kesehatan yang berhubungan dengan pencemaran air secara umum dapat diklasifikasikan menjadi dua yakni bahaya langsung dan bahaya tak langsung. Bahaya langsung terhadap kesehatan manusia/masyarakat dapat terjadi akibat mengkonsumsi air yang tercemar atau air dengan kualitas yang buruk, baik secara langsung diminum atau melalui makanan, dan akibat penggunaan air yang tercemar untuk berbagai kegiatan sehari-hari untuk misalnya mencuci peralatan makan dll, atau akibat penggunaan air untuk rekreasi. Bahaya terhadap kesehatan masyarakat dapat juga diakibatkan oleh berbagai dampak kegiatan industri dan pertanian. Sedangkan bahaya tak langsung dapat terjadi misalnya akibat mengkonsumsi hasil perikanan dimana produk-produk tersebut

dapat mengakumulasi zat-zat polutan berbahaya.

Pencemaran air minum oleh virus, bakteri patogen, dan parasit lainnya, atau oleh zat kimia, dapat terjadi pada sumber air bakunya, ataupun terjadi pada saat pengaliran air olahan dari pusat pengolahan ke konsumen. Di beberapa negara yang sedang membangun, termasuk di Indonesia, sungai, danau, kolam (situ) dan kanal sering digunakan untuk berbagai kegunaan, misalnya untuk mandi, mencuci pakaian, untuk tempat pembuangan kotoran (tinja), sehingga badan air menjadi tercemar berat oleh virus, bakteri patogen serta parasit lainnya.

Disinfeksi adalah memusnahkan mikro-organisme yang dapat menimbulkan penyakit. Disinfeksi merupakan benteng manusia terhadap paparan mikro-organisme patogen penyebab penyakit, termasuk di dalamnya virus, bakteri dan protozoa parasit (Bitton, 1994).

Khlorinasi adalah proses untuk pengaman terhadap mikroorganisme patogen. Pemusnahan

patogen dan parasit dengan cara disinfeksi sangat membantu dalam penurunan wabah penyakit akibat konsumsi air dan makanan. Namun demikian pada tahun-tahun belakangan ini ditemukan bahwa di dalam proses khlorinasi terjadi hasil samping berupa senyawa halogen organik yang dapat meracuni manusia maupun binatang, sehingga mendorong untuk menemukan disinfektan yang lebih aman. Ditemukan pula bahwa beberapa patogen atau parasit telah resisten terhadap disinfektan.

Sebagai fungsi tambahan selain kegunaannya untuk memusnahkan patogen, beberapa disinfektan seperti ozon, khlorine dioxide, berfungsi juga untuk oksidasi zat organik, besi dan mangan serta untuk mengontrol masalah rasa dan warna dan pertumbuhan alge.

## 2. FAKTOR YANG BERPENGARUH TERHADAP PROSES DISINFEKSI

### 2.1 Jenis Disinfektan

Efisiensi disinfektan tergantung pada jenis bahan kimia yang digunakan, beberapa disinfektan seperti ozon dan khlorine dioksida merupakan oksidator yang kuat dibandingkan dengan yang lainnya seperti khlorine.

### 2.2 Jenis Mikroorganisme

Di alam terdapat banyak sekali variasi mikroba patogen yang resisten terhadap disinfektan. Bakteri pembentuk spora umumnya lebih resisten terhadap disinfektan dibandingkan bakteri vegetatif. Terdapat juga variasi dari bakteri vegetatif yang resisten terhadap disinfektan dan juga diantara *strain* yang termasuk dalam spesies yang sama. Sebagai contoh *Legionella pneumophila* lebih tahan terhadap khlorine dibandingkan *E.coli*. Secara umum resistensi terhadap disinfeksi berurutan sebagai berikut : bakteri vegetatif < virus enteric < bakteri pembentuk spora *spore-forming bacteria* < kista protozoa.

### 2.3 Konsentrasi Disinfektan Dan Waktu Kontak

Inaktivasi mikroorganisme patogen oleh senyawa disinfektan bertambah sesuai dengan waktu kontak, dan idealnya mengikuti kinetika reaksi orde satu. Inaktivasi terhadap waktu mengikuti garis lurus apabila data diplot pada kertas log-log.

$$N_t/N_0 = e^{-kt}$$

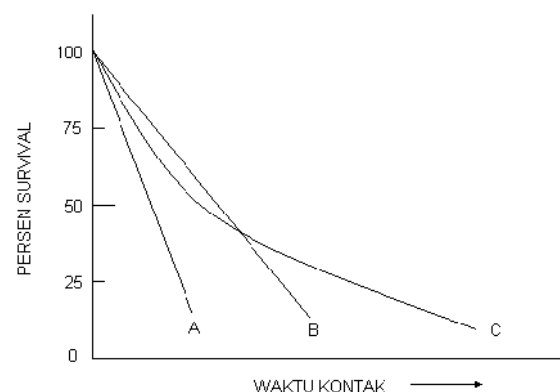
$N_0$  = Jumlah mikro-organisme pada waktu 0.

$N_t$  = Jumlah mikro-organisme pada waktu t.

$k$  = *decay constant* atau konstanta pemusnahan ( $\text{waktu}^{-1}$ ).

$t$  = waktu.

Namun demikian data inaktivasi di lapangan menunjukkan deviasi dari kinetik orde satu seperti terlihat pada Gambar 1 (Hoff dan Akin, 1986). Kurva C pada Gambar 1 menunjukkan deviasi dari kinetika orde satu. Bagian ujung kurva merupakan akibat adanya subpopulasi dari populasi heterogen mikro-organisme yang resisten terhadap disinfektan. Kurva A menunjukkan populasi mikroorganisme homogen yang sensitif terhadap disinfektan, Sedangkan kurva B menunjukkan populasi mikroorganisme homogen yang agak tahan terhadap disinfektan.



Gambar 1 : Kurva inaktivasi mikroorganisme di dalam proses disinfeksi.

Efektifitas disinfektan dapat digambarkan sebagai  $C \cdot t$ .  $C$  adalah konsentrasi disinfektan dan  $t$  adalah waktu yang diperlukan untuk proses inaktivasi sejumlah persentase tertentu dari populasi pada kondisi tertentu (pH dan suhu). Hubungan antara konsentrasi disinfektan dengan waktu kontak diberikan oleh hukum Watson sebagai berikut (Clark, 1989) :

$$K = C^n t$$

Dimana :

$K$  = Konstanta mikro-organisme tertentu yang terpapar disinfektan pada kondisi tertentu.

$C$  = Konsentrasi disinfektan (mg/l).

$t$  = Waktu yang diperlukan untuk memusnahkan persentase tertentu dari populasi (menit)

$n$  = Konstanta yang disebut koefisien pelarutan.

Apabila  $t$  diplot terhadap  $C$  pada kertas logaritma ganda (log-log),  $n$  adalah slope atau kemiringan dari garis lurus. Nilai  $n$  menunjukkan pentingnya konsentrasi disinfektan atau waktu kontak dalam proses inaktivasi mikro-organisme. Apabila  $n < 1$ , proses disinfeksi lebih dipengaruhi oleh waktu kontak dibandingkan dengan

konsentrasi disinfektan. Apabila  $n > 1$ , jumlah disinfektan merupakan faktor dominan yang mengontrol proses disinfeksi, namun demikian nilai  $n$  umumnya mendekati 1.

Penentuan nilai  $Ct$  dapat melibatkan temperatur dan pH dari medium suspensi. Sebagai contoh persamaan dikembangkan untuk mengetahui inaktivasi kista dari *Giardia Lamblia* pada proses pengolahan dengan disinfektan khlor (Clark, 1989 ; Hibler, 1987).

$$C.t = 0,9847 C^{0,1758} pH^{2,7519} T^{-0,1467}$$

Dimana :

C = Konsentrasi khlor ( $C < 4,23$  mg/l).  
 t = waktu untuk inaktivasi 99,99 % kista.  
 pH = pH (antara 6 dan 8).  
 T = temperatur (antara 0,5 dan 5,0 °C).

Nilai  $Ct$  untuk mikro-organisme patogen dapat dilihat pada Tabel 1. Tingkat ketahanan terhadap khlorin sebagai berikut kista protozoa > virus > bakteri vegetatif.

Tabel 1 : Harga  $Ct$  untuk Inaktivasi mikroba dengan disinfektan khlor (Pada suhu 5° C dan pH = 6,0).

Mikroorganisme	Konsentrasi khlor (mg/l)	Waktu Inaktivasi (menit)	$Ct$
E. coli	0,1	0,4	0,04
Polivirus 1	1,0	1,7	1,7
E. histolytica Cyst	5,0	18	90
Giardia Lamblia cyst	1,0	50	50
	2,0	40	80
	2,5	100	250
Giardia Muris cyst	2,5	100	250

Sumber : Hoof dan Akin (1986) didalam Biton (1994).

Cara lain untuk menggambarkan efektifitas disinfektan tertentu adalah dengan mengetahui koefisien kematian (*lethality coefficient*), dan persamaannya ditunjukkan sebagai berikut (Moris, 1975) :

$$\lambda = 4,6 / Ct_{99}$$

dimana :

4,6 = natural log of 100.  
 C = konsentrasi sisa disinfektan (mg/l).  
 $t_{99}$  = waktu kontak sampai inaktivasi 99 % mikro-organisme.

Nilai  $\lambda$  untuk menghancurkan 99 % mikro-organisme dengan ozon dalam waktu 10 menit pada temperatur 10 – 15 °C bervariasi dari 5

untuk *Entamoeba histolytica* hingga 500 untuk *E. Coli* (Chang, 1982).

## 2.4 Pengaruh pH

Dalam hal disinfeksi dengan senyawa khlor, pH akan mengontrol jumlah HOCl (asam hypochlorit) dan OCl<sup>-</sup> (hypokhlorit) dalam larutan. HOCl 80 kali lebih efektif dari pada OCl<sup>-</sup> untuk *E. Coli*. Di dalam proses disinfeksi dengan khlor, harga  $Ct$  meningkat sejalan dengan kenaikan pH. Sebaliknya inaktivasi bakteri, virus dan kista protozoa umumnya lebih efektif pada pH tinggi. Pengaruh pH pada inaktivasi mikroba dengan khloramin tidak diketahui secara pasti karena adanya hasil yang bertentangan. Pengaruh pH pada inaktivasi patogen dengan ozon juga belum banyak diketahui secara pasti.

## 2.5 Temperatur

Inaktivasi patogen dan parasit meningkat sejalan dengan meningkatnya temperatur (sebagai contoh  $Ct$  menurun).

## 2.6 Pengaruh Kimia Dan Fisika Pada Disinfeksi

Beberapa senyawa kimia yang dapat mempengaruhi proses disinfeksi antara lain adalah senyawa nitrogen anorganik maupun organik, besi, mangan dan hidrogen sulfida. Senyawa organik terlarut juga menambah kebutuhan khlor dan keberadaannya menyebabkan penurunan efisiensi proses disinfeksi.

Kekeruhan dalam air disebabkan adanya senyawa anorganik (misal lumpur, tanah liat, oksida besi) dan zat organik serta sel-sel mikroba. Kekeruhan diukur dengan adanya pantulan cahaya (*light scattering*) oleh partikel dalam air. Hal ini dapat mengganggu pengamatan coliform dalam air, disamping itu kekeruhan dapat menurunkan efisiensi khlor maupun senyawa disinfektan yang lain.

Kekeruhan (*turbidity*) harus dihilangkan karena mikroorganisme yang bergabung partikel yang ada di dalam air akan lebih resisten terhadap disinfektan dibandingkan dengan mikroorganisme yang bebas. Gabungan *Total Organic Carbon* (TOC) dengan kekeruhan akan menaikkan kebutuhan khlor. Mikroorganisme jika bergabung dengan zat kotoran manusia, sampah dan padatan air buangan akan tahan terhadap disinfektan. Penemuan ini penting untuk masyarakat yang mengolah air hanya dengan khlorinasi.

Efek proteksi dari partikel di dalam air terhadap ketahanan mikroorganisme di dalam proses disinfeksi tergantung pada ukuran dan

sifat alami dari partikel tersebut. Sel yang bergabung dengan poliovirus lebih tahan terhadap inaktivasi khlor, sedangkan bentonite dan aluminium phospat bila bergabung dengan virus tidak memberikan efek proteksi seperti tersebut di atas. Virus dan bakteri yang bergabung dengan bentonite tidak tahan terhadap inaktivasi ozon. Studi di lapangan menunjukkan virus yang bergabung dengan padatan lebih tahan terhadap khlor dari pada keadaan bebas. Menurunkan kekeruhan ke tingkat lebih kecil dari 0,1 NTU dapat menjadi ukuran untuk menghindari efek proteksi dari partikel pada saat proses disinfeksi.

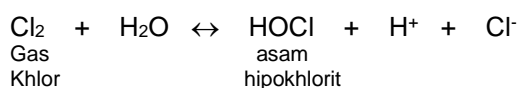
## 2.7 Faktor Lain

Beberapa studi menunjukkan bahwa patogen dan indikator bakteri yang ditumbuhkan di laboratorium lebih sensitif terhadap disinfektan dari pada yang berada di alam. *Flavobacterium* yang berada di alam 200 kali lebih tahan terhadap khlor dari pada yang dibiakkan di laboratorium. *Klebsiella pneumoniae* lebih tahan terhadap khloramin apabila tumbuh pada kondisi nutrient rendah. Penambahan ketahanan terhadap khloramin disebabkan oleh beberapa faktor faal (*physiological factors*), misal penambahan pengelompokan sel dan produksi *extracellular polymer*, perubahan membran lipid, dan pengurangan oksidasi kelompok *sulphydryl*. Kekebalan yang terjadi pada *strain* bakteri alami karena keterbatasan makanan dan zat perusak seperti disinfektan, mungkin pula disebabkan oleh *synthesis* dari protein tertekan, namun prosesnya tidak dapat dimengerti. Fenomenanya masih menjadi tanda tanya karena tidak bergunanya data disinfeksi di laboratorium untuk mengamati inaktivasi patogen pada keadaan di lapangan.

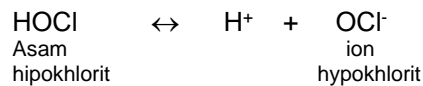
Paparan pertama dapat menambah ketahanan mikroba terhadap disinfektan. Paparan pengulangan mikro-organisme pada khlor menghasilkan adanya bakteri dan virus tertentu yang tahan terhadap disinfektan. Penggumpalan/penggabungan mikroorganisme patogen umumnya mengurangi efisiensi disinfektan. Sel bakteri, partikel viral dan kista protozoa di dalam gumpalan sangat terlindung dari aksi disinfektan (Chen, 1985).

## 3. DISINFEKSI DENGAN SENYAWA KHLOR (KHLORINE)

Gas khlor ( $\text{Cl}_2$ ) bila dimasukkan ke dalam air akan terhidrolisa, seperti persamaan berikut :



Asam hipokhlör berdisosiasi dalam air, seperti persamaan berikut :



Perbandingan  $\text{HOCl}$  dan  $\text{OCl}^-$  tergantung pada pH air. Khlor sebagai  $\text{HOCl}$  atau  $\text{OCl}^-$  disebut sebagai khlorin bebas yang tersedia (*free available chlorine*). Dissosiasi asam hipokhlör ( $\text{HOCl}$ ) akan berkurang pada pH rendah (suasana asam). Pada pH 5 atau lebih kecil sisa khlor akan berupa  $\text{HOCl}$ , pada pH 7,5 sekitar 50 % sisa khlor berupa  $\text{HOCl}$  dan pada pH 9 sebagian besar sisa khlor berupa  $\text{OCl}^-$ .

$\text{HOCl}$  bergabung dengan amonia dan senyawa organik nitrogen membentuk khloramin, yang dapat bergabung dengan khlorin yang tersedia.

## 3.1 Inaktivasi Mikroorganisme Dengan Khlor

Dari ketiga senyawa khlor ( $\text{HOCl}$ ,  $\text{OCl}^-$  dan  $\text{NH}_2\text{Cl}$ ), asam hipokhlör merupakan senyawa yang paling efektif untuk menginaktivasi mikroorganisme dalam air. Keberadaan zat yang mengganggu akan mengurangi efektifitas khlor, sehingga diperlukan konsentrasi khlor yang tinggi (20–40 ppm) untuk mengurangi virus.

Khlor terutama  $\text{HOCl}$ , umumnya sangat efektif untuk inaktivasi patogen dan bakteri indikator. Pengolahan air dengan pemberian khlor 1mg/l dengan waktu kontak kurang dengan waktu 30 menit umumnya efektif untuk mengurangi bakteri dalam jumlah yang cukup besar. *Campylobacter jejuni* menunjukkan lebih dari 99% dapat diaktivasi dengan dosis 0,1 mg/l khlorin bebas (waktu kontak 5 menit). Virus *enteric* walaupun sangat bervariasi dalam hal ketahanan terhadap khlor, namun umumnya patogen ini lebih tahan dari pada bakteri vegetatif. Hal ini menjelaskan mengapa virus sering terdeteksi pada efluen pengolahan kedua (*secondary treatment*). Khloramin lebih tidak efisien dibandingkan sisa khlor bebas pada proses inaktivasi virus. Kista protozoa (misal *Giardia*, *Lambli*a, *Entamoeba histolytica*, *Naegleria gruberi*) lebih tahan terhadap khlor dari pada bakteri dan virus. Dengan adanya  $\text{HOCl}$  pada pH = 6, Ct untuk *E.Coli* adalah 0,04 dibandingkan Ct 1,05 untuk poliovirus tipe I dan Ct 80 untuk *G.lambli*a. (Bitton, 1994).

*Cryptosporidium* sangat tahan terhadap disinfektan. Khlor atau monokhlöramin diperlukan konsentrasi 80 mg/l untuk menginaktivasi 90 % dengan waktu kontak 90 menit. Parasit ini tidak inaktivasi secara sempurna dengan larutan 3 % sodium hipokhlör dan oocysts dapat bertahan hingga 3 sampai 4 bulan

dalam larutan 2,5 % potasium dichromat. Parasit ini sangat tahan terhadap disinfektan pada pengolahan air minum, maupun air limbah.

Di dalam proses pengolahan air minum sisa khlor di dalam air olahan yang sampai ke konsumen dipertahankan minimal 0,1 mg/l. (JWWA,1978)

### 3.2 Kerusakan Sel oleh Khlor

Perlakuan fisik misalnya pemanasan, pendinginan, sinar matahari dan zat kimia misalnya khlor, logam berat misalnya *cooper* atau tembaga dapat merusak sel bakteri. Kerusakan yang disebabkan faktor lingkungan dapat menyebabkan pengurangan ukuran sel, kerusakan pada dinding sel serta dapat merubah fisiologi sel.

Khlor dan tembaga menyebabkan kerusakan besar pada bakteri coliform dalam air minum. Bakteri yang rusak tidak dapat berkembang apabila terdapat zat-zat tertentu (misal *sodium lauryl sulfate*, *sodium deoxycholate*). Namun demikian patogen yang rusak akibat khlor dan tembaga (misal *enterotoxigenic E.coli*) tetap menghasilkan enterotoxin dan mampu baik kembali dalam perut halus binatang dan tetap bersifat patogen. Hal ini menunjukkan kerusakan sel akibat pengolahan dengan khlor tetap dapat membahayakan kesehatan. Kerusakan akibat khlor dapat terjadi pada beberapa jenis patogen termasuk *enterotoxigenic E.coli*, *salmonella typhimurium*, *Yersinia enterocolitica* dan *Shigella* spp. Luasnya kerusakan akibat khlor tergantung pada jenis mikroorganismenya.

### 13.3 Kemampuan Pemusnahan Oleh Khlorin Bebas

Potensi pemusnahan mikroorganisme patogen oleh khlor bebas dapat meningkat apabila ditambahkan garam-garam seperti KCl, NaCl atau CaCl<sub>2</sub>. Mekanisme penambahan potensi akibat garam-garam belum bisa dijelaskan.

Kemampuan disinfeksi khlor dapat juga meningkat dengan adanya logam berat. Laju inaktivasi bakteri patogenik (seperti *Legionella pneumophila*) meningkat jika khlor bebas dimodifikasi dengan tembaga dan perak yang diproduksi dengan elektrolitik. Fenomena ini diperlihatkan pula untuk bakteri indikator dalam air kolam renang. Proses ini tidak secara sempurna menghilangkan virus *enteric* tertentu (misal virus hepatitis A) dalam air.

### 3.4 Mekanisme Cara Kerja Khlor

Khlorin menyebabkan dua jenis kerusakan

pada sel bakteri. Jenis kerusakan tersebut adalah :

#### 1) Perusakan kemampuan permeabilitas sel (disruption of cell permeability).

Khlor bebas merusak membran dari sel bakteri, hal ini menyebabkan sel kehilangan permeabilitasnya (kemampuan menembus) dan merusak fungsi sel lainnya. Paparan pada khlor menyebabkan kebocoran protein, RNA dan DNA. Sel mati merupakan hasil pelepasan TOC dan material yang menyerap sinar UV, pengurangan pengambilan (*uptake*) potasium dan pengurangan sintesis protein dan DNA. Perusakan kemampuan permeabilitas merupakan juga penyebab kerusakan spora bakteri oleh khlor (Bitton,1994).

#### 2) Perusakan asam nukleat dan enzim (Damage to nucleic acids and enzymes).

Khlorin merusak juga asam nukleat bakteri, demikian pula enzim. Salah satu akibat pengurangan aktivitas katalis adalah penghambatan oleh akumulasi hidrogen peroksida. Cara kerja khlor terhadap virus tergantung pada jenis virus. Perusakan asam nukleat merupakan cara utama pada inaktivasi bakteri phage 12 atau poliovirus tipe 1. Pelapis protein merupakan sasaran untuk virus jenis lain (Bitton ,1994).

### 3.5 Toksikologi (Sifat Racun) Senyawa Khlor dan Hasil Samping Senyawa Khlor

Secara umum resiko adanya bahan kimia dalam air tidak sejelas adanya mikroorganisme patogen. Hal ini disebabkan kurangnya data hasil samping proses disinfeksi. Sifat racun senyawa khlor dan hasil sampingnya (*by products*) merupakan hal yang penting untuk diketahui. Sekitar 79 % dari populasi di USA terpapar oleh khlor yang berasal dari air minum (US EPA 1989). Ada keterkaitan antara khlorinasi air minum dengan dengan meningkatnya risiko kanker usus. Keterkaitan ini sangat kuat untuk konsumen yang terpapar air yang diklorinasi selama lebih dari 15 tahun (Craun, 1988).

Trihalomethan (THM) seperti khloroform, diklorometan, bromodiklorometan, dibromo-khlorometan, bromoform, 1,2 dikloroetan, dan karbon tetraklorida merupakan senyawa khlor yang dihasilkan akibat proses khlorinasi air. Senyawa senyawa tersebut bersifat karsinogen. Kemungkinan pula ada hubungan antara khlorinasi air dengan meningkatnya risiko *cardiovascular* namun masih perlu diteliti lagi

(Craun, 1988). Pengetahuan ini mendorong U.S EPA untuk menentukan batas kandungan maximum (MCL) THM sebesar 100 µg/l.

Pengolahan air dengan khloramin tidak menghasilkan trihalometan, oleh sebab itu konsumen yang meminum air yang diolah dengan khloramin menunjukkan penurunan penyakit kanker dibandingkan mengkonsumsi air yang diolah dengan proses khlorinasi (Zierler, 1987).

Ada beberapa pendekatan untuk mengontrol dan mengurangi trihalometan (THM) dalam air minum adalah sebagai berikut (Wolfe, 1984) :

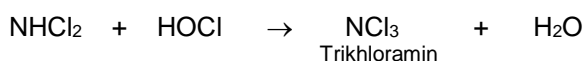
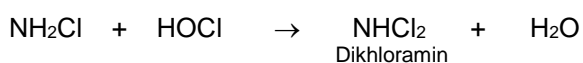
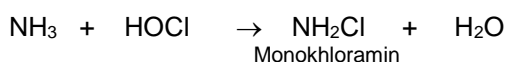
- Menghilangkan senyawa penyebab terbentuknya THM sebelum dilakukan khlorinasi. Terdapat hubungan yang kuat antara total senyawa yang berpotensi membentuk senyawa THM dengan total karbon organik (TOC) di dalam air.
- Menghilangkan senyawa THM yang telah terjadi dengan cara adsorpsi dengan menggunakan filter karbon aktif.
- Menggunakan alternatif disinfektan yang lain untuk proses disinfeksi yang tidak menimbulkan THM (misal khloramin, ozon atau ultra violet).

### 3.6 Khloraminasi

Khloraminasi adalah disinfeksi air dengan khloramin. *The Denver Water Departemen* telah berhasil menerapkan khloraminasi pada pengolahan air selama 70 tahun. Khloramin tidak bereaksi dengan senyawa organik untuk membentuk THM. Walaupun kurang efektif dibandingkan dengan khlor bebas, namun lebih efektif dalam hal pengontrolan biofilm mikroorganisme karena zat ini kurang berinteraksi dengan polisakarida. Disarankan untuk memakai khlor bebas sebagai disinfektan utama kemudian untuk menjaga sisa disinfektan pada sistem distribusi ditambah monokhloramin untuk mengontrol biofilm.

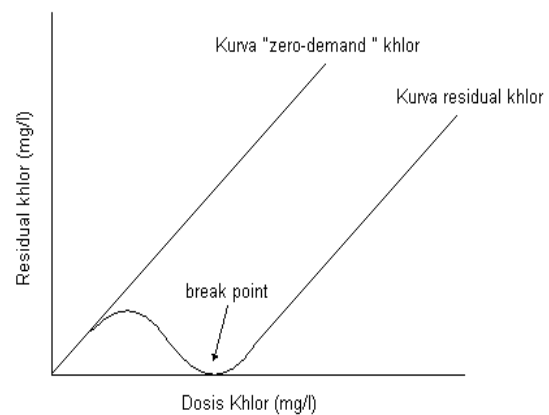
#### 3.6.1 Kimia Khloramin

Dalam larutan, HOCl beraksi dengan amonia dan membentuk khloramin anorganik, seperti persamaan berikut :



Perbandingan ketiga bentuk khloramin itu sangat tergantung pada pH air. Monokhloramin lebih dominan pada pH > 8,5. Monokhloramin dan Dikhloramin keduanya ada pada pH antara 4,5 dan 8,5 dan Trikhloramin terbentuk pada pH < 4,5. Monokhloramin merupakan zat yang dominan yang terbentuk pada suasana pH yang ada dalam proses pengolahan air dan air buangan (pH = 6 – 9). Di dalam proses pengolahan air minum diharapkan hanya terbentuk monokhloramin, karena dikhloramin dan trikhloramin menimbulkan rasa yang kurang enak pada air.

Percampuran khlor dan amonia menghasilkan kurva antara dosis khlor dengan residual khlor seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2 : Kurva kebutuhan dosis untuk reaksi khlorin dengan amonia.

Dosis khlorin 1 mg/l menghasilkan residu khlorin 1 mg/l. Namun apabila terdapat amonia di dalam air, residu khlorin mencapai puncak (pembentukan terutama monokhloramin, pada perbandingan khlorin dengan amonia-N antara 4:1 dan 6:1) kemudian menurun hingga minimum yang disebut *breakpoint*. *Breakpoint* saat khloramin dioksidasi menjadi gas nitrogen, terjadi apabila perbandingan khlorin dengan amonia-N antara 7,5 : 1 dan 11 : 1.



Penambahan khlorin diluar *breakpoint* menjamin adanya *residual* khlor bebas.

#### 3.6.2 Efek Biocidal dari Khloramin Anorganik

Pada tahun 1940an Butterfield dan rekan-rekan menemukan bahwa khlorin bebas menginaktivasi bakteri *enteric* lebih cepat dari pada khloramin anorganik. Selanjutnya aktivitas khloramin terhadap bakteri meningkat dengan meningkatnya temperatur dan konsentrasi ion hidrogen. Penelitian yang sama dilakukan

terhadap virus dan kista protozoa. Mycobacteria, virus enteric (seperti virus hepatitis A, rotavirus) dan kista protozoa tahan terhadap khloramin. Oleh karena itu disarankan air minum jangan didisinfektan hanya dengan khloramin, kecuali jika kualitas sumber airnya baik. Inaktivasi patogen dan parasit dengan khloramin disimpulkan pada Tabel 2.

### 3.6.3 Aspek Racun Dari Khloramin

Dikhloramin dan trikhloramin menimbulkan bau dan mempunyai angka batas bau (*threshold odor*) pada masing-masing konsentrasi 0,8 dan 0,02 mg/l. Khloramin menyebabkan *hemolytic anemia* pada pasien hemodialisis ginjal, namun

tidak terjadi pada binatang maupun manusia yang mengkonsumsi khloramin dari mulut. Walaupun khloramin menyebabkan perubahan pada bakteri dan menyebabkan kerusakan kulit pada tikus, namun penelitian menunjukkan belum ditemukan potensi sifat karcinogen.

Pada lingkungan air, khloramin meracuni ikan dan invertebrata. Pada suhu 20°C 96-hr LC<sub>50</sub> (50% konsentrasi lethal) dari monokhloramin antara 0,5 dan 1,8 mg/l. Salah satu mekanisme peracunan terhadap ikan adalah oksidasi yang *irreversible* dari hemoglobin menjadi methemoglobin, yang kapasitas membawa oksigennya sedikit.

Tabel 2 : Inaktivasi mikroorganisme di dalam air dengan khloramin.

Jenis Mikroba	Air	Suhu (° C)	pH	Perkiraan Harga Ct
Bakteia :				
E. coli	BDF	5	9,0	113
Coliforms, Salmonella.typhimurium, Salmonella. sonnei	tap water + 1 % air limbah domestik	20	6,0	8,5
M. fortuitum	BDF	20	7,0	2.667
M. avium	BDF	17	7,0	-
M. Intracellulare	BDF	17	7,0	-
Virus :				
Polio I	BDF	5	9,0	1.420
Polio I	Efluen primair	25	7,5	345
Hepatitis A	BDF	5	8,0	592
Coliphage MS2	BDF	5	8,0	2.100
Rotavirus SA11 :				
Dispersed	BDF	5	8,0	4.034
Cell -associated	BDF	5	8,0	6.124
Protozoan –cysts :				
G. muris	BDF	3	6,5 – 7,5	430 - 580
G. muris	BDF	5	7,0	1.400

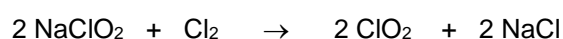
BDF : bufferd demand free water

Sumber : Bitton, 1994.

## 4. DISINFEKSI DENGAN KHLOR DIOKSIDA

### 4.1 Proses Kimia Khlor Dioksida

Khlor dioksida tidak membentuk trihalomethan (THM), juga tidak beraksi dengan amonia untuk menjadi Khloramin. Oleh karena itu zat ini banyak digunakan sebagai disinfektan pada pengolahan air minum. Oleh karena tidak dapat disimpan dalam keadaan tertekan dalam tanki, maka khlorin dioksida harus diproduksi di tempat. Khlor dioksida (ClO<sub>2</sub>) dihasilkan dari reaksi gas khlor dengan sodium khlorit sesuai dengan persamaan reaksi sebagai berikut :



atau dapat juga dihasilkan dari reaksi antara asam khlorida (HCl) dengan sodium atau natrium khlorit dengan persamaan reaksi sebagai berikut :



ClO<sub>2</sub> tidak terhidrolisa dalam air namun berada sebagai gas terlarut. Dalam larutan alkali, zat ini membentuk khlorit dan khlorat :



Pada pengolahan air, khlorit paling banyak terbentuk. Untuk mengurangi pembentukan THM, ClO<sub>2</sub> digunakan sebagai preoksidan dan disinfektan utama kemudian diikuti dengan penambahan khlor untuk menjaga residual khlor.

#### 4.2 Pengaruh Klor Dioksida Pada Mikroorganisme

Klor dioksida cepat bereaksi dan efektif sebagai disinfektan mikroba, sama bahkan lebih dari kemampuan klorin dalam inaktivasi bakteri dan virus pada proses pengolahan air dan air buangan. Efektif pula dalam merusak kista patogen protozoa seperti *Naegleria gruberi*. Efisiensi virucidal klor dioksida meningkat sejalan dengan meningkatnya pH dari 4,5 sampai 9. Inaktivasi bacteriophage f2 juga tinggi pada pH 9,0 dari pada pada pH 5,0. (Noss and Olivieri, 1985).

#### 4.3 Cara Kerja Klor Dioksida

Cara kerja utama klorin dioksida melibatkan kerusakan sintesis protein dalam sel bakteri. Diketahui juga kerusakan bagian luar membran dari bakteri gram-negatif. Penelitian mekanisme inaktivasi virus oleh klorin dioksida memperlihatkan hasil yang kontradiksi. Perlakuan dengan *bacterial phage* f2 menunjukkan bahwa pelapis protein adalah sasaran utama. Kehilangan pelekatan *phage* ini pada sel host paralel dengan inaktivasi virus. Khususnya pengurangan residu tyrosine dalam pelapis protein merupakan kerja yang utama klor dioksida dalam f2 *phage*. Perusakan pelapis protein viral terjadi pada virus lain seperti poliovirus. Beberapa peneliti menyimpulkan bahwa kerja utama klorin dioksida adalah *viral genome*.

#### 4.4 Sifat Racun Klor Dioksida

Klorin dioksida bereaksi dengan fungsi thyroid menghasilkan serum kolesterol tinggi pada binatang yang makan kalsium rendah dan lipid tinggi. Klorin dioksida mempunyai hasil samping dua senyawa anorganik, klorit ( $\text{ClO}_2^-$ ) dan klorat ( $\text{ClO}_3^-$ ). Klorit lebih menjadi perhatian dalam pengaruhnya terhadap kesehatan dibandingkan klorat dan keduanya dapat bergabung dengan hemoglobin menyebabkan methemoglobinemia.

### 5. DISINFEKSI DENGAN OZON

#### 5.1 Senyawa Ozon

Ozon merupakan senyawa yang mampu membunuh bakteri dan mempunyai daya oksidasi yang kuat. Sejak beberapa dekade terakhir beberapa negara di Eropa telah memanfaatkan ozon untuk mengolah air minum, demikian pula Amerika dan bahkan Jepang. Ozon pertama kali diperkenalkan sebagai zat pengoksidasi kuat untuk menghilangkan rasa, bau dan warna. Pengolahan air pertama

menggunakan ozon pada tahun 1906 di Bon Voyage Water Treatment Plant, Nice, Perancis. (Bitton, 1994). Oksidator ini sekarang digunakan sebagai disinfektan utama untuk membunuh atau menginaktivasi mikroorganisme patogen dan untuk mengoksidasi zat besi dan mangan, senyawa penyebab rasa dan bau, warna, zat organik, deterjen, fenol serta zat organik lain. Sebagai disinfektan, ozon dapat dengan cepat membunuh virus, bakteri dan jamur serta mikroorganisme lainnya. Perbandingan potensial oksidasi relatif (*relative oxidation potentials*) ozon dengan beberapa senyawa disinfektan lainnya dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 : Potensial oksidasi relatif (*Relative Oxidation Potentials*) beberapa senyawa disinfektan

Senyawa Disinfektan	Potensial Oksidasi ( Volt)	Potensial Oksidasi Relatif *
Fluorine	3,06	2,25
Radikal Hidroksil	2,80	2,05
Atom Oksigen	2,42	1,78
Ozon	2,07	1,52
Hidrogen Peroksida	1,77	1,30
Radikal Perhidroksil	1,70	1,25
Asam Hipoklorida	1,49	1,10
Khlorine	1,36	1.00

\* Di dasarkan pada khlorine = 1,00  
(Rice, 1989)

Dibandingkan dengan disinfektan konvensional seperti senyawa klor (klorin) atau kaporit yang umum digunakan untuk pengolahan air minum, ozon mempunyai beberapa kelebihan. Klorin misalnya, dapat menimbulkan bau yang tajam (bau kaporit). Selain itu disinfeksi dengan klor (klorin) dapat menimbulkan dampak sampingan dengan terbentuknya senyawa trihalomethan (THMs) yang bersifat karsinogen. Sedangkan ozon selain tidak menimbulkan bau juga dapat membuat air menjadi lebih segar. Umumnya pengolahan air dengan ozon digabungkan dengan proses koagulasi-flokulasi, pengendapan dan penyaringan seperti pada pengolahan air konvensional atau digabungkan dengan pengolahan khusus.

Pre-ozonisasi pada proses pengolahan air minum dapat menurunkan potensi pembentukan THMs dan pencetus partikel koagulasi pada saat pengolahan air. Pengolahan dengan ozon dapat juga digabungkan bersama-sama dengan proses adsorpsi dengan karbon aktif. Di Amerika lebih dari 40 pengolahan air pada saat ini menggunakan ozon sebagai oksidator, dan sebagian kecil digunakan sebagai disinfektan.



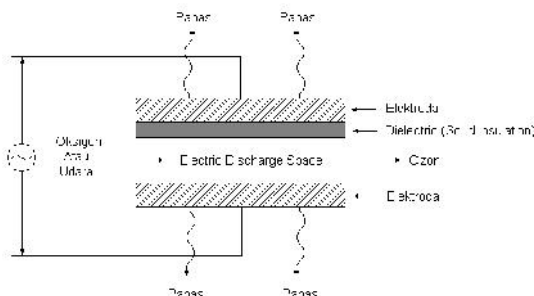
Ozon dapat diterapkan pada beberapa titik pada pengolahan air konvensional. Efektifitasnya sebagai disinfektan tidak bisa dikontrol oleh pH, dan tidak bereaksi dengan amonia.

Ditinjau dari biaya konstruksinya maupun biaya operasi dan pemeliharaan, disinfeksi dengan Ozon lebih mahal dari pada klorinasi dan disinfeksi dengan UV. Penggunaan energi merupakan bagian biaya operasi yang paling mahal. Oleh karena ozon tidak meninggalkan residu pada air, pengolahan dengan ozon kadangkala dikombinasikan dengan post-klorinasi. Ozon merubah senyawa kompleks menjadi sederhana, beberapa senyawa kemungkinan sebagai makanan mikroba pada sistem distribusi air. Ozone merupakan oksidator yang lebih kuat dibandingkan dengan kloror.

## 5.2 Pembuatan Ozon

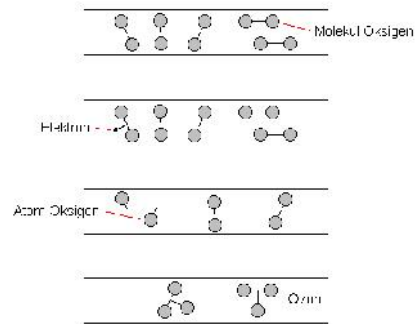
Ozon mempunyai rumus kimia  $O_3$  dalam bentuk gas yang tidak stabil dengan kelarutan di dalam air sekitar 20 kali lebih besar bila dibandingkan dengan kelarutan oksigen. Ozon dapat dihasilkan dengan beberapa cara yaitu secara elektrolisis, kimiawi, termal atau fotokimia, serta melalui peluahan muatan listrik (*electric discharge*). Untuk skala besar, cara dengan peluahan listrik inilah yang saat ini banyak digunakan secara komersial.

Prinsip peluahan muatan listrik adalah dengan melewati udara kering atau oksigen ke sebuah ruang di antara elektroda-elektroda yang dialiri listrik bolak-balik tegangan tinggi, yaitu sekitar 8.000 sampai 20.000 volt. Peluahan terputus-putus (*intermittent discharge*) yang berlangsung di antara dua elektroda akan menyebabkan elektron-elektron bertabrakan dengan molekul oksigen sehingga terbentuklah senyawa ozon ( $O_3$ ). Secara sederhana prinsip pembangkit ozon dengan cara peluahan listrik serta mekanisme pembentukan ozon dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3 : Prinsip alat pembangkit ozon dengan cara peluahan listrik.

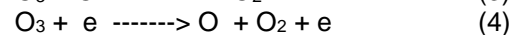
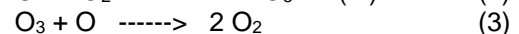
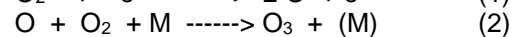
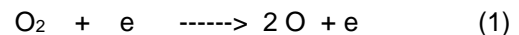
Sumber : Design Criteria For Waterworks Facilities, JWWA, 1978.



Gambar4 : Ilustrasi pembentukan ozon dengan peluahan listrik secara parsial.

Sumber : Design Criteria For Waterworks Facilities, JWWA, 1978.

Reaksi pembentukan ozon secara sederhana dapat diuraikan sebagai berikut :



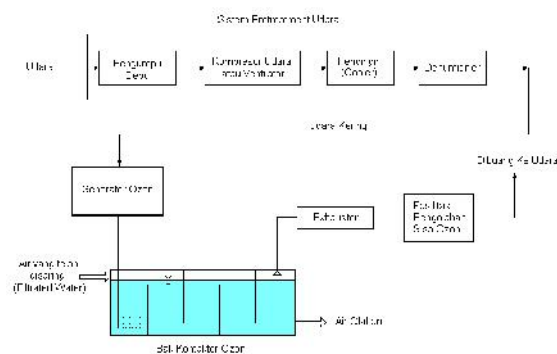
Persamaan reaksi (1) dan (2) adalah reaksi pembentukan ozon, tetapi agar reaksi (2) berlanjut diperlukan material ketiga M. Material M tersebut dapat berupa oksigen, nitrogen atau dinding tabung. Di lain pihak jika reaksi terus berlanjut maka ozon yang telah terbentuk akan terurai kembali melalui reaksi (3) dan (4). Dengan kata lain reaksi pembentukan dan peruraian ozon terjadi bersamaan di antara kedua kutub elektroda. Pada saat reaksi terjadi pada kesetimbangan terbentuk ozon pada konsentrasi dengan tertentu. Jika peluahan listriknya diperbesar atau voltase dinaikan, dan ruang peluahan yang dilalui udara atau oksigen diperbesar sehingga waktu tinggal udara atau oksigen di dalam ruang peluahan menjadi lebih lama maka ozon yang terbentuk menjadi lebih besar. Tetapi pada saat mencapai konsentrasi yang tertinggi maka ozon yang terbentuk akan terurai kembali. Pada prakteknya konsentrasi ozon yang terbentuk berkisar antara 3 -4 % apabila menggunakan udara sebagai bahan baku. Jika menggunakan bahan baku oksigen murni konsentrasi ozon yang terbentuk berkisar 6 – 8 %.

Di dalam prakteknya peralatan pembuat atau pembangkit ozon dapat dibagi menjadi dua macam berdasarkan bentuknya yaitu tipe plat dan tipe tabung seperti terlihat pada Gambar --. Dari kedua tipe tersebut, tipe tabung yang paling banyak digunakan secara luas. Alat ini mempunyai ruang-ruang peluahan berupa tabung-tabung dengan dua lapis dinding. Dinding bagian luar dibuat dari baja tahan karat, sedangkan dinding dalam dibuat dari gelas (kaca) yang berfungsi sebagai konduktor. Seperti

diterangkan di atas, di dalam pembuatan ozon diperlukan ruang-ruang peluahan listrik. Ruang-Ruang tersebut berfungsi menerima aliran udara kering atau oksigen murni untuk diubah menjadi ozon.

Untuk keperluan tersebut dibutuhkan tenaga listrik sebesar 17 – 20 kWh untuk setiap kg ozon yang terbentuk. Selama berlangsungnya proses pembentukan ozon, akan dihasilkan panas sehingga diperlukan air pendingin untuk menjaga agar suhunya tetap atau konstan. Jumlah air pendingin yang diperlukan sekitar 2 – 5 m<sup>3</sup> untuk 1 kg ozon dan suhu air pendingin harus lebih kecil 30 ° C.

Ada beberapa faktor-faktor yang dapat mempengaruhi pembuatan ozon yaitu : tekanan parsial oksigen, temperatur operasi, tegangan listrik yang digunakan, konsentrasi uap air (jika menggunakan bahan baku udara). Untuk skala besar, Jika udara digunakan sebagai bahan baku pembuatan ozon, udara tersebut harus diolah lebih dahulu sehingga menjadi benar-benar kering sebelum dialirkan ke unit pembangkit ozon. Sistem disinfeksi untuk pengolahan air minum dengan menggunakan ozon menggunakan bahan baku udara dapat dilihat pada Gambar 5, sedangkan salah satu contoh unit generator ozon yang terpasang dapat dilihat pada Gambar 6.



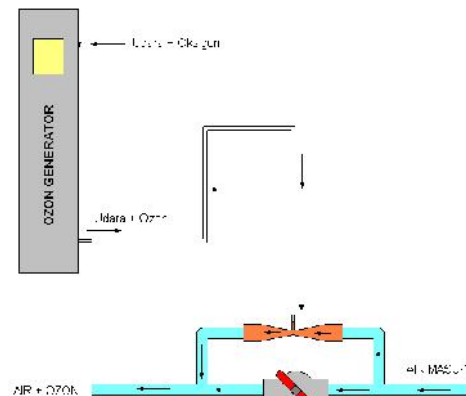
Gambar 5 : Sistem disinfeksi dengan ozon untuk pengolahan air minum.

Sumber : Design Criteria For Waterworks Facilities, JWWA, 1978.



Gambar 6 : Salah satu contoh generator ozon untuk pengolahan air minum.

Untuk skala kecil dan untuk keperluan rumah tangga saat ini telah banyak dijual dipasaran generator ozon skala kecil misalnya generator ozon yang banyak digunakan untuk proses pengolahan air siap minum (airminum isi ulang). Sistem injeksi ozon skala kecil yang banyak digunakan dapat lihat seperti pada Gambar 7, sedangkan salah satu contoh aplikasi penggunaan disinfeksi ozon untuk pengolahan air skala kecil dapat dilihat seperti pada Gambar 8.



Gambar 7 : Sistem injeksi ozon untuk pengaolahan air minum skala kecil.



Gambar 8 : Salah satu contoh aplikasi penggunaan disinfeksi ozon untuk pengolahan air skala kecil.

### 5.3 Pengaruh Ozon Pada Mikroorganisme Indikator Dan Patogen

Sebagai oksidan ozon sangat kuat dibandingkan khlorin. Inaktivasi bakteri sangat cepat pada konsentrasi yang hanya sebesar 0,1 mg/l. Nilai Ct untuk inaktivasi 99 % E.coli sangat rendah antara 0,01 sampai 0,2, dan untuk virus enteric 0,04 sampai 0,42.

Ozon lebih efektif dari pada khlorin, monokhloramin atau khlorin dioksida terhadap rotavirus manusia dan simian. Konsentrasi ozon yang diperlukan untuk mengaktifasi 99,9 % enterovirus dalam air (25°C, Ph = 7) dalam waktu 10 menit, bervariasi antara 0,05 dan 0,6 mg/l. Namun demikian beberapa bakteri patogen (misalnya *Mycobacterium fortuitum*) lebih tahan dari pada virus terhadap ozon. Ketahanan terhadap ozon pada beberapa mikroorganisme ditemukan berurutan sebagai berikut : *Mycobacterium fortuitum* > poliovirus tipe 1 > *Candida parapsilosis* > *E.coli* > *Salmonella typhimurium*. Padatan tersuspensi (misal tanah liat, padatan lumpur) sangat mengurangi kemampuan inaktivasi ozon.

Oocysts *Cryptosporidium* sangat tahan terhadap khlorinasi. Ozon pada konsentrasi 1 mg/l mengaktifasi oocysts *Cryptosporidium parvum* dalam waktu 6 menit pada level 10<sup>4</sup> oocysts per 1 ml. Kista dari *Giardia lamblia* dan *G.muris* juga efektif diinaktivasi oleh ozon. Efektivitas ozon sangat bervariasi sesuai dengan temperatur. Ketahanan kista *G.lamblia* terhadap ozon meningkat apabila temperatur diturunkan dari 25°C menjadi 5°C. Fenomena yang sama terjadi pada *Cryptosporidium* oocysts.

Proses peroxone yang menggunakan campuran ozon dan hidrogen peroksida, telah dicoba untuk mengontrol rasa dan bau, hasil samping disinfeksi dan mikroba patogen. Diperoleh bahwa efisiensi inaktivasi dari Peroxone ( $H_2O_2O_3 = 0,3$  atau kurang) sama dengan menggunakan ozon saja. Namun demikian Peroxone lebih baik dari ozon dalam hal mengoksidasi senyawa penyebab rasa dan bau.

#### 5.4 Mekanisme Cara Kerja Ozon

Dalam media cair ozon menghasilkan radikal bebas yang menginaktivasi mikroorganisme. Ozon mempengaruhi permeabilitas, aktivitas enzim dan DNA dari sel bakteri. Residu guanine dan/atau thymine merupakan sasaran dari ozon. Pengolahan ozon menyebabkan konversi *circular plasmid* DNA tertutup (ccDNA) *E.coli* menjadi *circular* DNA terbuka (ocDNA).

Ozon inaktivasi virus dengan cara merusak inti asam nukleat. Pelapis protein terpengaruh juga, namun kerusakan pelapis protein kecil dan mungkin tidak ada pengaruhnya pada adsorpsi poliovirus ke dalam sel *host* (VP4, capsid polypeptide penyebab penempelan pada sel *host*, tidak terpengaruh oleh ozon). Terhadap rotavirus, ozon merubah capsid dan inti RNA.

#### 5.5 Hasil Samping Ozonisasi

Telah diketahui terbentuknya senyawa mutagenik atau karsinogen akibat proses khlorinasi air dan air buangan. Namun sedikit diketahui mengenai hasil samping ozonisasi. Aldehid merupakan hasil samping, namun pengaruhnya terhadap kesehatan belum diketahui. Penelitian terakhir menunjukkan bahwa air yang diolah dengan ozon dengan dosis 1 mg/l memperlihatkan kenaikan mutagenesis. Namun Mutagenesitas berkurang pada level ozon tinggi (> 3 mg/l). Senyawa mutagenik dapat dihilangkan dengan butiran karbon aktif (GAC).

Jika air mengandung zat besi atau mangan, maka disinfeksi dengan menggunakan ozon dapat mengakibatkan terjadinya reaksi oksidasi sehingga zat besi atau mangan yang terlarut di dalam air akan bereaksi dengan ozon membentuk oksida besi atau oksida mangan yang tidak larut di dalam air, sehingga warna air berubah menjadi kecoklatan atau kadang-kadang terbentuk endapan yang berwarna coklat kehitaman.

#### 6. DISINFEKSI DENGAN SINAR ULTRAVIOLET

Disinfeksi dengan ultraviolet pertama dilakukan pada permulaan abad ini, namun terabaikan karena khlorinasi lebih disukai. Namun akhir-akhir ini populer kembali karena ditemukan teknologi yang lebih baik.

Sistem UV menggunakan lampu merkuri tekanan rendah yang tertutup dalam tabung quartz. Tabung diselupkan dalam air yang mengalir dalam tanki sehingga tersinari oleh radiasi UV dengan panjang gelombang sebesar 2.537 Å yang bersifat germicidal. Namun transmisi UV dengan quartz berkurang sejalan dengan penggunaan yang terus menerus. Oleh karena itu lampu quartz harus dibersihkan secara teratur dengan cara pembersihan mekanik, kimiawi dan ultrasonic. Diusulkan bahan teflon sebagai pengganti quartz, namun transmisi radiasi UV nya rendah dibandingkan quartz.

##### 6.1 Mekanisme Perusakan Oleh UV

Penelitian terhadap virus menunjukkan bahwa pada awalnya UV merusak viral *genome*, selanjutnya merusak struktural pelindung virus.

Radiasi UV merusak DNA mikroba pada panjang gelombang hampir 260 nm. Menyebabkan dimerisasi thymine, yang menghalangi replikasi DNA dan efektif menginaktivasi mikroorganisme.

## 6.2 Inaktivasi Patogen Oleh Radiasi UV

Inaktivasi mikroba sebanding dengan dosis UV, yang memakai satuan microwat per detik per centimeter kuadrat. Inaktivasi mikroorganisme oleh radiasi UV dapat ditampilkan dengan persamaan berikut :

$$N/N_0 = e^{-K_{Pdt}}$$

$N_0$  = jumlah awal mikroorganisme (#/ml)

$N$  = Jumlah mikroorganisme yang selamat (#/ml)

$K$  = konstanta laju inaktivasi ( $\mu W \cdot s/cm^2$ )

$Pd$  = intensitas sinar UV mencapai organisme

$t$  = waktu paparan dalam detik

Persamaan diatas menggunakan beberapa asumsi, salah satunya adalah logaritma dari fraksi selamat terhadap waktu adalah linear. Namun sampel natural menunjukkan kinetik inaktivasi tidak linear terhadap waktu, yang kemungkinan disebabkan ketahanan organisme diantara populasi alam lainnya.

Efisiensi disinfeksi dengan UV tergantung pada jenis mikroorganisme. Secara umum ketahanan mikroorganisme terhadap UV mengikuti pola yang sama dengan disinfektan kimia, seperti berikut (gambar 6.16): kista protozoa > spora bakteri > virus > bakteri vegetatif, kecenderungan ini didukung oleh Tabel 6.4 yang memperlihatkan dosis UV ( $\mu W \cdot s/cm^2$ ) untuk inaktivasi mikroorganisme 90 %. Virus seperti hepatitis A, membutuhkan dosis UV sebesar  $2.700 \mu W \cdot s/cm^2$  untuk memperoleh tiga-log pengurangan.

## 6.3 Variabel Yang Mempengaruhi Kerja UV

Beberapa variable (seperti partikel tersuspensi, COD, warna) dalam efluent air limbah dapat mempengaruhi transmisi UV dalam air dan akhirnya mempengaruhi kebutuhan untuk disinfeksi. Beberapa senyawa organik (seperti zat humus, senyawa phenol, lignin sulfonat dari industri pulp dan kertas, besi feri) dapat juga mempengaruhi transmisi UV dalam air.

Bakteri indikator sebagian terlindungi dari radiasi UV apabila bersatu dengan partikel padatan tersuspensi. Padatan tersuspensi hanya melindungi sebagian mikroorganisme dari efek bahaya radiasi UV. Hal ini disebabkan partikel suspensi dalam air dan air buangan hanya mengabsorpsi sebagian dari sinar UV. Padatan mengabsorpsi 75% cahaya, dan sisa 25% dipantulkan. Umumnya mineral tanah liat tidak terlalu banyak melindungi mikroorganisme karena zat ini banyak memantulkan cahaya UV. Efek perlindungan tergantung pada nilai spesifik

absorpsi dan pantulan radiasi UV, dan nilai ini menurun dengan meningkatnya pemantulan cahaya. Oleh sebab itu flokulasi yang diikuti dengan penyaringan efluent melalui pasir atau unggun antrasit untuk menghilangkan zat-zat yang mengganggu akan memperbaiki efisiensi disinfeksi UV.

Fotoreaktivasi dapat terjadi pada mikroba yang telah terpapar UV oleh gelombang cahaya tampak (*visible*) antara 300 nm dan 500 nm. Potensi perbaikan oleh iradiasi UV pada bakteri yang rusak akibat paparan UV telah dibuktikan. DNA yang rusak dapat juga diperbaiki dalam ruang gelap oleh sistem perbaikan sel. Segmen DNA yang rusak oleh UV hilang dan diganti dengan hasil sintesa segmen yang baru. Fotoreaktivasi telah dikaji pada skala penuh pengolahan air buangan yang menggunakan disinfeksi UV. Walaupun total dan fecal coliform mengalami fotoreaktivasi, namun fecal streptococci tidak mengalami. Gambar 6.18 menunjukkan meningkatnya E.coli yang selamat akibat fotoreaktivasi setelah iradiasi UV. *Legionella pneumophila* yang diperlakukan dengan iradiasi UV mengalami fotoreaktivasi setelah terpapar cahaya *visible* (cahaya matahari tidak langsung). Oleh karena itu air yang telah diolah dengan UV tidak boleh terpapar oleh cahaya *visible* selama penyimpanan.

## 6.4 Disinfeksi UV Untuk Air Minum Dan Air Limbah

### 1) Air Minum

Disinfektan ini efisien untuk menghilangkan virus yang merupakan substansi utama penyebar penyakit air dari sumber air tanah. Di rumah sakit khlorin ditambahkan untuk menjaga residu setelah dilakukan iradiasi UV.

Dengan dosis  $30.000 \mu W \cdot s/cm^2$ , UV mengurangi *Legionella pneumophila* sampai 4-5 log dalam 20 menit pada sistem distribusi air di rumah sakit. Walaupun dosis ini tidak efektif untuk mengaktivasi kista *Giardia lamblia*, yang membutuhkan dosis  $63.000 \mu W \cdot s/cm^2$  untuk pengurangan 1-log, nilai ini jauh lebih besar dari minimum dosis yang dikeluarkan oleh *U.S Public Health Service* yaitu  $16.000 \mu W \cdot s/cm^2$ .

### 2) Efluen Air Limbah

Disinfeksi dengan UV saat ini secara ekonomis bersaing dengan khlorinasi dan tidak menimbulkan hasil samping racun seperti pada khlorinasi. Masalah yang terjadi adalah kesulitan mengukur dosis UV yang diperlukan untuk disinfeksi efluent air limbah. Model seperti pengujian dengan spora *Bacillus subtilis* atau RNA phage MS2 diajukan untuk menentukan

dosis UV yang efektif untuk disinfeksi. MS2 menunjukkan ketahanan yang lebih tinggi terhadap iradiasi UV dibandingkan virus enteric (seperti virus hepatitis A, rotavirus).

Dosis minimum 16.000  $\mu\text{W-s/cm}^2$  menunjukkan penurunan lebih dari 3-log coliform dalam efluent air limbah. Penelitian pada pengolahan air skala penuh, menunjukkan efisiensi yang sama dengan proses khlorinasi untuk inaktivasi total coliform, fecal coliform dan fecal streptococci. Sistem ini lebih baik dari khlorinasi untuk inaktivasi *Clostridium perfringens* dan coliphages.

Penambahan bersama-sama ozon dan UV tidak memberikan inaktivasi lebih terhadap fecal coliform pada efluent air limbah. Namun inaktivasi bakteri indikator bertambah apabila iradiasi UV diikuti dengan proses ozonisasi.

## 6.5 Keuntungan Dan Kerugian Disinfeksi Dengan UV

Berikut keuntungan disinfeksi air atau air limbah dengan iradiasi UV antara lain :

- Efisien untuk menginaktivasi bakteri dan virus pada air minum (diperlukan dosis yang lebih tinggi untuk kista protozoa).
- Tidak menimbulkan hasil samping senyawa karcinogen atau hasil samping yang bersifat racun.
- Tidak menimbulkan masalah rasa atau bau.
- Tidak diperlukan penyimpanan dan penanganan bahan kimia beracun.
- Unit UV hanya memerlukan ruang yang kecil.

Beberapa kerugian disinfeksi dengan UV antara lain adalah :

- Tidak ada residu disinfektan pada air yang telah diolah (oleh karena itu diperlukan penambahan khlorin atau ozon setelah proses UV)
- Relatif sulit menentukan dosis UV.
- Pembentukan biofilm pada permukaan lampu.
- Masalah dalam hal pemeliharaan dan pembersihan lampu UV.
- Masih ada potensi terjadi fotoreaktivasi pada mikroba patogen yang telah diproses dengan UV.

## 7. TEKNOLOGI LAIN BERDASARKAN FOTOINAKTIVASI

### 7.1 Penggunaan Radiasi Matahari Untuk Disinfeksi Air Minum

Di daerah pedalaman yang tidak mempunyai akses untuk memperoleh air minum, radiasi matahari dapat digunakan untuk

disinfeksi air. Intensitas radiasi matahari pada 600  $\text{W/m}^2$  selama 5 jam diperlukan untuk pengurangan bakteri indikator dan patogen. Tidak ada data untuk inaktivasi virus dan parasit.

## 7.2 Fotodinamik Inaktivasi

Fotodinamik inaktivasi (disinfeksi fotokimia) terdiri dari penggunaan sinar tampak atau sinar matahari sebagai sumber energi,  $\text{O}_2$ , dan pewarna seperti metilen biru. Diteliti pada kondisi laboratorium dan pilot plant. Fotokimia disinfeksi efluent air limbah pada kondisi lapangan menunjukkan pengurangan mikroba 1,8 log untuk poliovirus1, 3,0 log untuk coliform, 3,1 log untuk fecal coliform dan 3,7 log untuk enterococci selama hampir 1 jam pada kondisi alkali. Pengurangan ini membutuhkan intensitas cahaya 700-2.100  $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ , konsentrasi metilen biru 8 – 9 ppm, pH = 8,7 – 8,9 dan konsentrasil oksigen terlarut 4,5 – 5,5 mg/l. (Acher, 1990).

## 7.3 Disinfeksi Dengan Irradiasi Gama

Proses disinfeksi dengan iradiasi sinar gama (cobalt 60) khususnya untuk air limbah dengan dosis 463 krad menghasilkan 3 log inaktivasi untuk coliphage dan 4-5 log inaktivasi untuk coliforms dan *heterotrophic plate count*. (Farooq, 1992).

## 8. PENUTUP

Dari uraian tersebut di atas dapat dimengerti bahwa ada banyak cara yang dapat dilakukan untuk proses disinfeksi baik untuk pengolahan air minum untuk pengolahan air limbah. Proses disinfeksi dapat dilakukan secara kimia ataupun secara fisika dimana tiap jenis disinfektan mempunyai kelebihan dan kelemahan masing-masing. Oleh karena itu pemilihan tiap jenis proses disinfeksi harus disesuaikan dengan tujuan yang akan dicapai dengan mempertimbangkan beberapa hal misalnya tingkat keramahan terhadap lingkungan, hasil samping proses disinfeksi, efektifitas, investasi, kemudahan proses, biaya operasi dan perawatan, serta pertimbangan lainnya.

## DAFTAR PUSTAKA

1. "Design Criteria For Waterworks Facilities", JWWA, 1978.
2. Bitton Gabriel. 1994. Wastewater Microbiology, A John Wiley & Sons, INC., New York.

3. Chang, S.L., 1982. The safety of water disinfection. Annual Review Public Health 3 : 393 -418.
4. Chen, Y.S.R., O.J. Sproul, and A. Rubin. 1985. Inactivation of Naegleria gruberi cyst by chlorine dioxide. Water Reseach 19 : 783-789.
5. Clark,R.M., E.J. Read, and J.C. Hoff. 1989. Analysis of inactivation of giardia lamblia by chlorine. Journal Environ. Eng. Div. Am. Soc.Civ.Eng.115:80-90.
6. Craun,G.F. 1988. Surface water supplies and health. Journal American Water Works Association. 80:40-52.
7. Farooq, S., C.S. Kurucz, T.D. Waite, W.J. Cooper, S.R. Mane, and J.H. Greenfield. 1992. Treatment of wastewater with high energy electron beam irradiation. Water Science Technology 26:1265-1274.
8. Hibler, C.P., C.M. Hancock. 1987. Waterborne giardiasis, In : *Drinking Water Microbiology*, G.A. McFeters, Ed. Springer-verlag. New York.
9. Hoff, J.C., E.W. Akin. 1986. Microbial resistance to disinfectant : Mechanisms and significance. Environ.Health Perspect.
10. Moris, J.C. 1975. Aspect of the quantitative assessment of germicidal efficiency. In : *Disinfection of water and Wastewater*, J.D. Johnson, Ed. Ann Arbor Science, Ann Arbor, MI.
11. Noss, C.I., and V.P. Olivieri, 1985. Disinfecting capabilities of oxychlorine compounds. Appl. Environ. Microbiology. 50:1162-1164.
12. Rice, R.G.1989. Ozone oxidation products – Implications for drinking water treatment, pp. 153-170, in : *Biohazards of Drinking Water Treatment*, R.A. Larson, Ed. Lewis Publishing. Chelsea, MI.
13. U.S. EPA .1989. *Drinking Water Health Effects Task Fosce. Health Effects Of Water Treatment Technologies*. Lewis Pubs. Chelsea, MI.
14. Wolfe, R.L., N.R. Ward, and B.H. Olson.1984. Inorganic chloramines as drinking water disinfectants.
15. Zierler,S., R.A. Danley, and L. Feingold. 1987. Type of disinfectant in drinking water patterns of mortality in Massachussetts. Environmental Health Perspect. 68: 275-287.